8Б

УДК 004.932; 528.85/.87(15)

Л.А. Белозерский, Л.В. Орешкина
Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, г. Минск
blzrsk@newman.bas-net.by, ola@newman.bas-net.by

Принципы селективно-яркостной сегментации изменений внешнего облика объекта моноспектральной космической съемки

В статье анализируются задачи, которые решаются на этапе обработки данных дистанционного зондирования Земли и предусматривают интерактивное участие человека в оценке качества материалов спутниковой съемки, улучшении полученных изображений и тематическом использовании в зависимости от разрабатываемых предложений.

Введение

Большое число задач, решаемых на этапе обработки данных дистанционного зондирования Земли, предполагает интерактивное участие человека в оценке качества материалов спутниковой съемки, улучшении полученных изображений и тематическом использовании в зависимости от разрабатываемых приложений.

Одной из таких задач является мониторинг поверхности Земли с обнаружением происходящих во времени изменений, вызванных теми или иными причинами. Тематическая обработка информации в таком применении заключается в сопоставлении разновременных изображений интересующего участка, обнаружении и классификации обнаруженных изменений. Существуют как традиционные (визуализация, фильтрация, получение новых изображений расчетными методами), так и современные методы такой обработки, использующие адаптивные алгоритмы на основе топографических отображений [1-3]. Последние применяются для более содержательной (с точки зрения тематической интерпретации) классификации и сегментации космических изображений. Использование алгоритмов на основе топографических отображений позволяет добиться наилучших результатов при выделении тематической информации.

В основе селективно-яркостной сегментации изменений, обнаруживаемых при сопоставлении разновременных изображений спутниковой съемки одного и того же наземного объекта, лежит анализ разностной гистограммы этих изображений [4]. Как известно, такие гистограммы представляются как следующая зависимость числа пикселей от яркости:

$$\Delta H(L) = H(L) - H_0(L), \tag{1}$$

где $H_0(L)$ – гистограмма изображения, полученная как характеристика «штатного» состояния объекта, отклонения от которого в последующем и являются интересующими, представляемыми как изменения внешнего облика объекта; $H(L)$ – гистограмма изображения текущей съемки объекта, рассчитанной на контроль возникновения возможных отклонений его состояния от «штатного».

С учетом выполняемой роли гистограмма $H_0(L)$ имеет название эталонной, опорной или базовой.

Для реальных изображений такая гистограмма, соответствующая ряду изменений внешнего облика объекта за время между съемками, имеет вид, представленный на рис. 1.

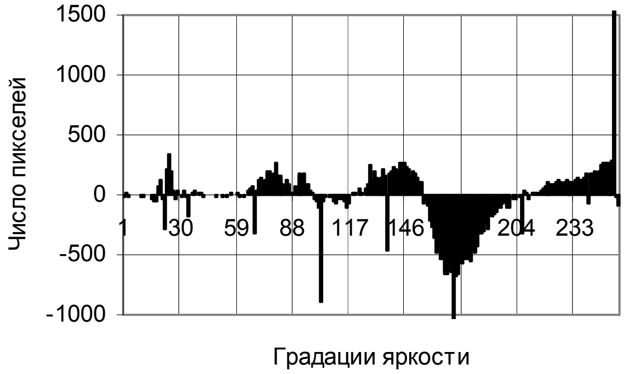


Рисунок 1 – Разностная гистограмма разновременных изображений объекта спутниковой съемки

Рис. 1 заставляет обратить внимание на то, что разностная гистограмма, при наличии произошедших изменений внешнего облика объекта, состоит из группировок положительных и отрицательных значений площадей (группировок пикселей[1]) на отличающихся интервалах яркостей. Особенностями образования этих группировок являются изменения гистограммы текущего изображения по сравнению с гистограммой предшествующего ему эталонного изображения. В свою очередь упоминаемые изменения всегда оказываются следствием преобразований отражающих свойств компонент[2] рассматриваемого объекта на площадях тех компонент его эталонного состояния, которые подверглись этим преобразованиям.

Как уже было показано при оценке информационного содержания гистограмм [5], изменения отражающих свойств компоненты объекта естественно ведут к замене части или всей площади, занимаемой ею в составе этого объекта. Кроме того, такие изменения могут охватывать частично или полностью площади не одной, а целого ряда компонент.

В результате площадь объекта остается всегда неизменной. Однако материалы или элементы поверхности, которые формировали штатное распределение его яркостей на изображении, при изменениях внешнего облика объекта частично или полностью исчезают, уступая место другим. Поэтому наряду с положительными по знаку изменениями гистограмм, свойственными появлению новых по отражающим свойствам площадей компонент, появляются отрицательные изменения, отражающие уменьшение площадей компонент как следствие «оккупации» их территории новыми компонентами.

При этом новым компонентам, как уже отмечалось, в природе и технике характерны распределения вероятностей отражающих свойств их поверхностей. А это ведет к тому, что *изменения объектов носят не точечный, а интервальный характер, что и отражает разностная гистограмма.* А границы интервала – это и есть те два порога, поиск которых открывал бы возможность яркостной сегментации изменений внешнего облика объекта по его разновременным изображениям.

[1] Следует иметь в виду, что каждому пикселю изображения, а также связанной с этим изображением гистограммы, соответствует элемент земной поверхности, определяемый как пространственное разрешение (разрешающая способность) съемки.

[2] Отражающие свойства компонент, составляющих объект, пропорциональны их яркостям на интересующих изображениях.

Принципы сегментирования

Обратимся, в частности, к рассмотрению рис. 1. Здесь отметим, что положительные группирования как раз и соответствуют здесь появлению в составе объекта за время между съемками новых компонент, характеризуемых яркостями каждого такого (*p*-го) интервала $L^{+}_{p\min} \div L^{+}_{p\max}$, где $p = 1, 2, 3, 4$. Автоматическое (программное) определение указанных интервалов представляет собой отдельную задачу, основанную на объединении в их составе яркостей группирования пикселей, соответствующих выполнению следующего условия[1]:

$$\Delta H(L) > 0 \quad \forall L .$$

Одновременному сокращению площадей старых компонент в общем случае соответствуют q интервалов разностной гистограммы $L^{-}_{q\min} \div L^{-}_{q\max}$, содержащих отрицательные группирования пикселей. Для той же ситуации изменений, представленной разностной гистограммой (рис. 1), имеем $q = 1$. В результате, согласно изложенному следует считать, что за счет изменений одной компоненты объекта, имеющей яркости также в легко определяемом диапазоне $L^{-}_{1\min} \div L^{-}_{1\max}$, здесь произошли яркостные изменения в четырех интервалах ($p = 1, 2, 3, 4.$)

Таким образом, *выделение яркостных интервалов изменений, возможность которого открывает разностная гистограмма разновременных изображений наземного объекта, представляет собой первый принцип селективно-яркостного сегментирования изменений его внешнего облика.*

В целях дальнейшего анализа принципов использования разностных гистограмм обратимся к их моделированию. Причина обращения к моделированию состоит в отсутствии точного априорного знания как пространственных характеристик изменений, так и распределений вероятностей яркостей изменяемых и измененных компонент для реальных изображений спутниковой съемки. Модели, предполагая известными интересующие характеристики, должны позволить зрительно и теоретически проследить особенности обнаружения изменений, представить их сущностные свойства, которые внешне проявляются в разностных гистограммах экспериментальных съемок всего лишь как упомянутые выше группирования пикселей.

С целью приближения такого моделирования к реальным условиям, позволяющим избежать предвзятости в формировании модели гистограммы, воспользуемся полученным реально по данным спутниковой съемки односпектральным изображением участка земной поверхности, рассматриваемым как интересующий объект (рис. 2*а*). На рис 2*б* и *в* приведены соответственно гистограмма этого изображения, принятая в качестве эталонной $H_0(L)$, и ее приближенная 6-ю компонентами модель $H(L)$, идентифицированная с ней по приблизительному совпадению, что достаточно для обеспечения достоверности и наглядности результатов. Параметры моделирующих ограниченных нормальных распределений сведены в табл. рис. 2*г*.

На полученной основе для последующего анализа предложена модель гистограммы текущей съемки того же объекта $H(L)$ (рис. 2*д*), представляющая изменения эталонной гистограммы путем включения при моделировании в ее состав 7-й компоненты –

[1] Следует отметить, что в реальных условиях определение интервала группирований до пикселя $\Delta H(L)$ часто затруднено в силу влияния шумов изображений, вызывающих существенное для этой задачи пропадание пикселей. Это явление особенно чувствительно для небольших значений на границах интересующего интервала $\Delta H(L_{\min})$ или $\Delta H(L_{\max})$.

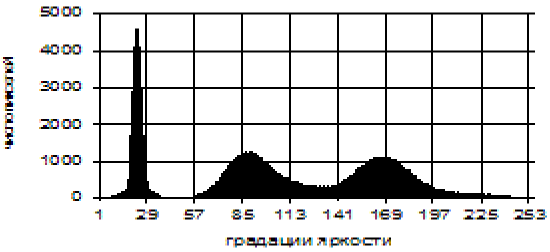
компоненты изменений. Для удобства анализа принято, что она имитирует результат 1%-го замещения площади одной из компонент (№ 6) эталонного изображения, занимающей до этого 14% площади объекта. В качестве параметров ее распределения выбраны $x_0 = 55$ и $\sigma = 4$. Разностная гистограмма моделей текущей и эталонной гистограмм показана на рис. 2*е*.



а)



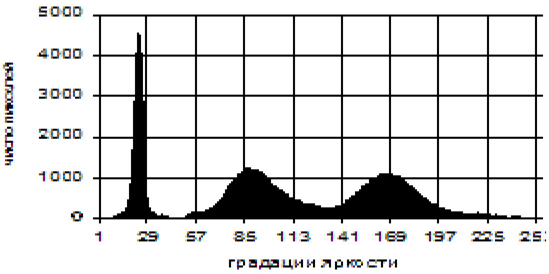
б)



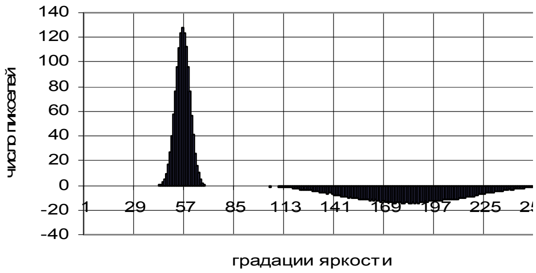
в)

№ компоненты	s/S*100 %	X0	σ
1	15	22	2
2	5	22	7
3	27	85	12
4	11	110	15
5	28	165	15
6	14	181	35

г)



д)



е)

Рисунок 2 – Исходные данные и результат моделирования разностной гистограммы (а – изображение участка космической съемки размером 128898 пикселей, б – его гистограмма, в – модель эталонной гистограммы, г – таблица компонент параметров распределений модели эталонной гистограммы, д – модель текущей гистограммы с изменениями, е – разностная гистограмма)

Одновременно с этими результатами на рис. 3 даны взвешенные для суперпозиции распределения яркостей всех компонент, параметры которых и обеспечили приблизительную идентификацию модели, приведенной на рис. 2*в*.

Таким образом, сама разностная гистограмма обеспечивает, как это следует из рассмотрения рис. 2*е*, определение в составе объекта интервала яркостей $L^{+}_{l\min} \div L^{+}_{l\max}$ новой компоненты изменений $(p = 1)$. Одновременно рис. 3 позволяет установить, что распределение этой компоненты в пределах того же интервала яркостей пересекается, по крайней мере зрительно, с распределениями 2-й, 3-й и 4-й компонент.

При этом здесь легко представить, что степень такого пересечения тем больше, чем больше дисперсии пересекающихся распределений и чем больше относительные площади, которые занимают описываемые компоненты.

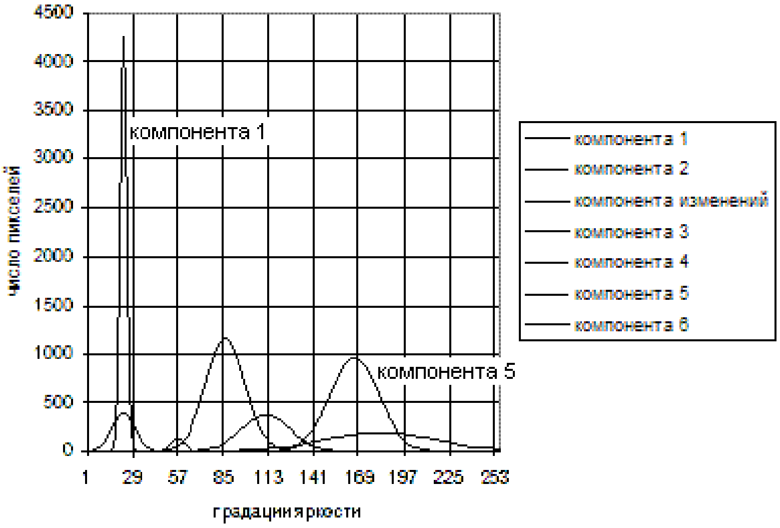


Рисунок 3 – Набор распределений вероятностей яркостей компонент, взвешенных их относительной площадью в составе объекта и приведенных к числу пикселей его изображения (1-6 – распределения компонент штатного состава объекта; между 2-м и 3-м – распределение компоненты изменений)

В этих условиях можно теперь обратить внимание на то, что выделенному по разностной гистограмме интервалу яркостей соответствует площадь компоненты изменений:

$$s_{изм} = \Delta s \cdot \sum_{L=L^{+}_{1\min}}^{L=L^{+}_{1\max}} \Delta H(L), \qquad (2)$$

где Δs – пространственная разрешающая способность спутниковой съемки;

$L^{+}_{1\min} \div L^{+}_{1\max} = 43 \div 69$ – интервал изменений, определенный по разностной гистограмме (положительных значений); $\Delta H(L)$ – разностная гистограмма.

С другой стороны, в силу особенностей моделирования гистограмм, истинным значением площади компоненты изменений должна быть следующая величина, определяемая непосредственно по распределению вероятностей самой компоненты:

$$s^{1}_{изм} = \Delta s \cdot \sum_{\forall L \;\; \Delta H(L)>0} \left[f_{изм}(L) \cdot \frac{s_{изм}}{S} \cdot N \right], \qquad (3)$$

где $f_{изм}(L)$ – плотность распределения вероятностей яркостей компоненты изменений;

$\frac{s_{изм}}{S}$ – относительная площадь компоненты изменений ($s_{изм}$ – площадь компоненты, S – площадь объекта); N – число пикселей изображения объекта; […] – означает целую часть рассматриваемого выражения.

Отсюда, принимая во внимание сноску на странице 2, оценку площади изменений на интервале $L^{+}_{1\min} \div L^{+}_{1\max}$, следует считать приближенной:

$$s^{1}_{изм} = \Delta s \cdot \sum_{\forall L \;\; \Delta H(L)>0} \left[f_{изм}(L) \cdot \frac{s_{изм}}{S} \cdot N \right] \approx \Delta s \cdot \sum_{L=L^{+}_{\min}}^{L=L^{+}_{\max}} \left[f_{изм}(L) \cdot \frac{s_{изм}}{S} \cdot N \right]. \qquad (4)$$

В то же время при моделировании без имитации шумов изображения это равенство оказывается точным, так как при определении границы интервала ни один пиксель группирования изменений не исчезает. В частности, преобразовав выражение (2) в соответствии с принципами моделирования гистограмм [6], получим:

$$s_{изм} = \Delta s \cdot \sum_{L=L^+_{1\min}}^{L=L^+_{1\max}} \Delta H(L) = \Delta s \cdot \left(\sum_{L=L^+_{1\min}}^{L=L^+_{1\max}} H(L) - \sum_{L=L^+_{1\min}}^{L=L^+_{1\max}} H_{э}(L) \right) =$$
$$= \Delta s \cdot \left(\sum_{L=L^+_{1\min}}^{L=L^+_{1\max}} \left[\sum_{i=1}^{7} f_i(L) \frac{s_i}{S} N \right] - \sum_{L=L^+_{1\min}}^{L=L^+_{1\max}} \left[\sum_{i=1}^{6} f_i(L) \frac{s_i}{S} N \right] \right) = \quad (5)$$
$$= \Delta s \cdot \sum_{L=L^+_{1\min}}^{L=L^+_{1\max}} \left[f_7(L) \frac{s_7}{S} N \right].$$

Как раз в последнем выражении (5) при сопоставлении уменьшаемого и вычитаемого аналитически наглядно прослеживается компенсация «хвостов» распределений, соседствующих с распределением компоненты изменений и выделенных изучаемым интервалом яркостей.

Полученный результат – легко достигаемый уровень сегментации изменений внешнего облика объекта. В то же время знания интервала яркостей и размеров (площадей) сегментов изменений без определения их мест на изображении, а следовательно, на территории объекта обычно недостаточны для решения задачи обнаружения изменений.

Для выбора пути устранения указанного недостатка необходимо обратиться к уточнению особенностей связи в паре гистограмма-изображение. Она достаточно очевидна. Если гистограмма является яркостным распределением пикселей изображения $H(L)$, то само изображение представляет собой их пространственно-яркостное распределение $L(x,y)$. Поэтому именно яркостная связь этих двух распределений открывает возможность определения пространственных положений (координат) элементов разрешения каждого найденного сегмента изменений.

В частности, применив выделение яркостей пикселей *p*-го интервала $L^+_{p\min} \div L^+_{p\max}$ на текущем изображении, удается легко устранить упомянутый информационный недостаток и получить знания о том, как распределены в пространстве изображения эти яркости после изменений объекта. Причем наиболее целесообразно это преобразование выполнять путем бинаризации и представления результата в виде множества:

$$B_p(x,y) = \begin{cases} 1 \quad при \quad L(x,y,t) \in \left(L_{p\min} \div L_{p\max}\right); \\ 0 \quad при \quad L(x,y,t) \notin \left(L_{p\min} \div L_{p\max}\right). \end{cases} \quad (6)$$

Возвращаясь вновь к рассматриваемому примеру моделирования разностной гистограммы, открываем, что выделение частей текущего изображения, имеющих яркости в единственном здесь интервале изменений $L^+_{1\min} \div L^+_{1\max}$, должно иметь итогом представление их в виде 7-ми составляющих сегментов, так как согласно (5) соответствующая площадь в конечном итоге определяется следующим образом:

$$s_{изм} = \Delta s \cdot \sum_{L=L^+_{1\min}}^{L=L^+_{1\max}} H(L) = \Delta s \cdot \sum_{L=L^+_{1\min}}^{L=L^+_{1\max}} \left[\sum_{i=1}^{7} f_i(L) \frac{s_i}{S} N \right] = \Delta s \cdot \sum_{L=L^+_{1\min}}^{L=L^+_{1\max}} \left[f_1(L) \frac{s_1}{S} N \right] +$$
$$+ \Delta s \cdot \sum_{L=L^+_{1\min}}^{L=L^+_{1\max}} \left[f_2(L) \frac{s_2}{S} N \right] + \ldots + \Delta s \cdot \sum_{L=L^+_{1\min}}^{L=L^+_{1\max}} \left[f_7(L) \frac{s_7}{S} N \right] . \quad (7)$$

Очевидно, что каждая из получаемых здесь составляющих площадей представляет собой часть компонент объекта, имеющих яркости в рассматриваемом диапазоне. Все они образуют множество, состоящее из разнесенных (в общем случае) в пространстве измерений отдельных подмножеств. Каждое из них должно иметь свое геометрическое положение в составе соответствующего изображения. Отсюда текущее изображение объекта, преобразованное согласно (6), для особенностей приведенных моделей гистограмм, должно иметь вид примерно такой, как показан на рис. 4.

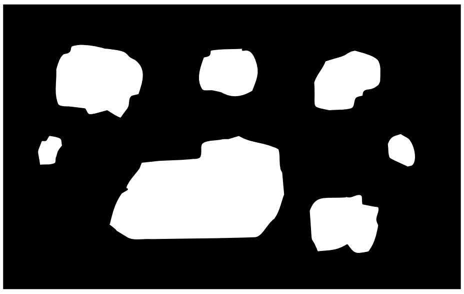


Рисунок 4 – Типовая картина бинаризованного текущего изображения в заданном яркостном интервале

Известно, что гистограммы спутниковых изображений наземных объектов в большинстве случаев представляют собой распределения площадей их компонент по яркостям, не сосредоточенные на одном избранном интервале. Поэтому яркостные характеристики компонент изменений чаще всего могут совпадать с яркостными характеристиками некоторых компонент объекта. Такая, в частности, ситуация характерна для моделируемых гистограмм (рис. 2*в*, *д*), где согласно рис. 3 части распределений вероятностей компонент («хвосты») имеют яркости, которые входят в интервал $L^{+}_{1\min} \div L^{+}_{1\max}$. Именно представляемые этими «хвостами» части компонент (каждой компоненте в целом соответствует все распределение) наряду с сегментом изменений составляют бинаризованное изображение рис. 4.

Конечно, если не осуществлять введенной при этом бинаризации, то каждый из сегментов текущего изображения вместо однотонных и максимально ярких здесь их представлений мог бы иметь отличающиеся яркости на черном фоне. Но все они образовывали бы вместе выделяющий их и заранее известный интервал $L^{+}_{1\min} \div L^{+}_{1\max} = 43 \div 69$. Новой информации это не позволило бы получить. Поэтому, интересуясь положением этих сегментов в пространстве изображения, от яркостей можно отказаться. Одновременно, переход к бинаризации в этой ситуации позволяет, во-первых, избежать плохой наблюдаемости рассматриваемых сегментов при невысоких яркостях интервала. Во-вторых, выделенные при этом сегменты – это составляющие единого множества, операции, которые достаточно удобны в последующих преобразованиях.

Таким образом, *вторым принципом локально-яркостной сегментации является переход от яркостных представлений об изменениях (от разностной гистограммы) к пространственным представлениям о размещении всех сегментов текущего изображения, характеризующих в интервале сегментации состояние объекта после изменений его внешнего облика.*

Здесь следует обратить внимание на то, что рассмотренное до этого определение яркостного интервала изменений и размеров участка, на котором они произошли, не зависит от геометрических несоответствий исходных изображений друг другу, так как гистограммы не связаны с пространственными характеристиками изображений.

В отличие от этого любые искажения геометрической передачи пропорций и размещения компонент объекта, свойственные текущему изображению, отражаются на размещении компонент и их частей, характеризуемых яркостями изучаемого интервала ($L^{+}_{p\min} \div L^{+}_{p\max}$). Однако при отсутствии сведений о геометрическом смещении или повороте текущего изображения упомянутые искажения внешне никак здесь себя не проявляют.

К сожалению, выполненное пространственно-яркостное выделение на текущем изображении еще не позволяет отделить сегменты изменений от всех наблюдаемых здесь сегментов заданного интервала (рис. 4). Для устранения такого недостатка достаточно обратиться к эталонному изображению. Применение к нему выделения компонент и их частей, аналогичного реализованному для текущего изображения, представляется следующей бинаризацией:

$$B_p^0(x,y) = \begin{cases} 1 & при \quad L_0(x,y,t) \in (L_{p\min} \div L_{p\max}); \\ 0 & при \quad L_0(x,y,t) \notin (L_{p\min} \div L_{p\max}). \end{cases} \tag{8}$$

В соответствии с принятой к рассмотрению моделью гистограммы эталонного изображения число компонент объекта в заданном яркостном интервале составляет 6 в отличие от текущего изображения. Эталон характеризует штатное состояние объекта до любых не запланированных его изменений. Поэтому здесь компонента изменений отсутствует. В итоге суммарная площадь всех имеющих место компонент оказывается равной:

$$\Delta s \cdot \sum_{L=L^{+}_{1\min}}^{L=L^{+}_{1\max}} H_Э(L) = \Delta s \cdot \sum_{L=L^{+}_{1\min}}^{L=L^{+}_{1\max}} \left[\sum_{i=1}^{6} f_i(L) \frac{s_i}{S} N \right] = \Delta s \cdot \sum_{L=L^{+}_{1\min}}^{L=L^{+}_{1\max}} \left[f_1(L) \frac{s_1}{S} N \right] + \\ + \Delta s \cdot \sum_{L=L^{+}_{1\min}}^{L=L^{+}_{1\max}} \left[f_2(L) \frac{s_2}{S} N \right] + \ldots + \Delta s \cdot \sum_{L=L^{+}_{1\min}}^{L=L^{+}_{1\max}} \left[f_6(L) \frac{s_6}{S} N \right]. \tag{9}$$

Согласно этому преобразованное эталонное изображение должно выглядеть следующим образом (рис. 5).

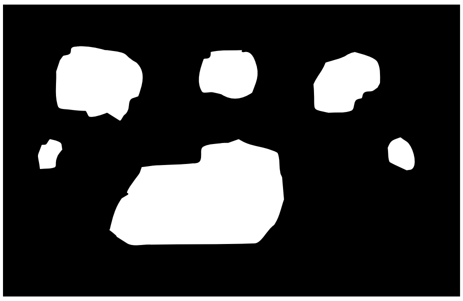


Рисунок 5 – Типовая картина бинаризованного эталонного изображения в заданном яркостном интервале

Отсюда *третий принцип локально-яркостной сегментации состоит в переходе от яркостных представлений об изменениях (разностной гистограммы) к пространственным представлениям о размещении всех компонент эталонного изображения, имеющих яркости в заданном интервале и отражающих состояние объекта до изменений его внешнего облика.*

Точно так же, как и для текущего изображения, здесь любые искажения геометрической передачи пропорций и размещения компонент объекта, свойственные эталонному изображению, отражаются в размещении обнаруживаемых компонент и их частей, характеризуемых яркостями интервала изменений ($L^{+}_{p\min} \div L^{+}_{p\max}$). Отличия здесь состоят только в том, что это изображение получено в другое время. Поэтому геомет-

рические искажения его должны, как правило, не совпадать с искажениями текущего изображения. В то же время при рассмотрении изолированно только этого результата бинаризации упомянутые искажения себя и здесь не проявляют.

Логически следующим этапом локально-яркостной сегментации является сопоставление яркостно бинаризованного текущего изображения с эталонным с целью определения, какие сегменты этого интервала сохранились на нем за время между съемками и какие оказались приобретенными. Аналитически выполняемой для этого операцией является разность множеств (6) и (8), состоящих из единичных по яркостям пикселей, каждый из которых характеризуется координатами положения в пространстве изображения:

$$B_{\Delta}(x,y) = B_p(x,y) \setminus B_p^0(x,y). \tag{10}$$



Рисунок 6 – Типовая картина разности бинаризованных текущего и эталонного изображений в яркостном интервале обнаружения изменений

Наряду с этим, выполнению этой операции соответствует вычитание изображений согласно следующему правилу:

$$B_{\Delta}(x,y) = B_p(x,y) - B_p^0(x,y) = \begin{cases} 1 \ \ \textit{при} \ B_p(x,y) = 1 \wedge B_p^0(x,y) = 1; \\ 0 \ \textit{при всех остальных сочетаниях значений}. \end{cases} \tag{11}$$

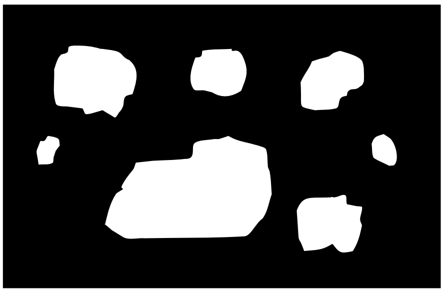
Указанная разность при отсутствии взаимных геометрических искажений текущего и эталонного изображений сегментов рассматриваемого яркостного интервала (рис. 4 и 5) приводит к выделению сегмента изменений и имеет следующее представление (рис. 6).

Таким образом, *четвертый принцип локально-яркостной сегментации состоит в определении пространственного положения сегмента изменений на основе использования разности бинаризованных изображений в яркостном интервале обнаруженных изменений* ($L^+_{p\min} \div L^+_{p\max}$).

Ограничениями таких возможностей здесь и являются часто имеющие место геометрические искажения эталонного и текущего изображений. Если же они одинаковы для того и другого, то рассмотренный результат будет характеризоваться только ошибками пространственного положения компоненты изменений, демонстрируемой рис. 6. Здесь они отражались бы в некотором смещении в плоскости изображения одного единственного сегмента – области изменений. Однако, если наличие или отсутствие искажений нечем подтвердить, то зрительно это не может быть никак обнаружено.

При отличиях геометрических искажений пары сопоставляемых изображений, кроме смещенности положения сегмента изменений, в разности их возникают новые сегменты, образуемые остатками от рассмотренного выше вычитания компонент бинаризованных изображений, не подвергнутых изменениям, но не совпадающих теперь друг с другом. Так, на рис. 7 приведены эталонное и текущее изображения, бинаризованные в интервале яркостей при имеющемся взаимном геометрическом несоответствии

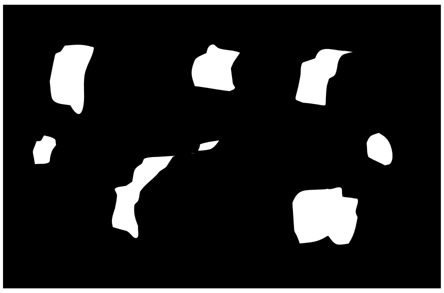
(текущее изображение смещено влево по сравнению с эталонным) и приблизительный вид их разности.



а)



б)



в)

Рисунок 7 – Геометрически смещенное текущее изображение объекта (а), эталонное изображение (б) и их разность (в)

К аналогичным разностям приводят любые геометрические искажения сопоставляемых изображений, бинаризованных в яркостном интервале обнаруженных изменений. И чем больше геометрические сдвиги разновременных изображений, тем большие площади приобретают получаемые здесь разностные остатки. Однако сегмент истинных изменений при этом сохраняет свое присутствие в составе разностного изображения. Теперь он, характеризуясь смещенными координатами в силу тех же искажений, требует еще и своего обнаружения среди указанных остатков. Последние на разностном бинарном изображении (рис. 7*в*), выступают как отдельные сегменты изменений в рассматриваемом яркостном интервале. Пространственное выделение каждого из них играет роль ложной тревоги в оценке изменений внешнего облика объекта.

Как уже отмечалось в начале рассмотрения принципов локально-яркостной сегментации, в составе разностной гистограммы (рис. 2*е*) наряду с положительными группированиями пикселей присутствуют отрицательные группирования, отражающие уменьшение площадей компонент как следствие «оккупации» их территории новыми компонентами.

Если вначале интервал яркостей, соответствующий отрицательным значениям разностной гистограммы, не представлял интереса, то теперь следует обратить на него внимание. В рассматриваемой ситуации моделирования этот интервал равен $L^{-}_{1\min} \div L^{-}_{1\max} = 90 \div 255$.

Учитывая простоту ситуации, обусловленную всего одним изменением объекта в результате 1%-го замещения площади всего одной из его компонент, и руководствуясь особенностями разностной гистограммы, достаточно просто увидеть, что указанный интервал яркостей характеризует исходные яркости конкретной компоненты эталонного изображения. Именно эта компонента подверглась изменениям, обнаруживаемым на текущем изображении по разностной гистограмме.

Отсюда, если выполнить бинаризацию эталонного изображения в интервале исходных яркостей изменяемой компоненты ($L^-_{q\min} \div L^-_{q\max}$), то результатом ее должно быть изображение пространственного положения этой компоненты.

Бинаризация здесь выполняется по правилам, уже известным из предыдущего изложения:

$$B^0_q(x,y) = \begin{cases} 1 \quad при \quad L_0(x,y,t) \in \left(L^-_{q\min} \div L^-_{q\max}\right); \\ 0 \quad при \quad L_0(x,y,t) \notin \left(L^-_{q\min} \div L^-_{q\max}\right). \end{cases} \qquad (12)$$

Результат бинаризации в диапазоне $L^-_{1\min} \div L^-_{1\max} = 90 \div 255$ в принципе[1] должен иметь представление, показанное на рис. 8.

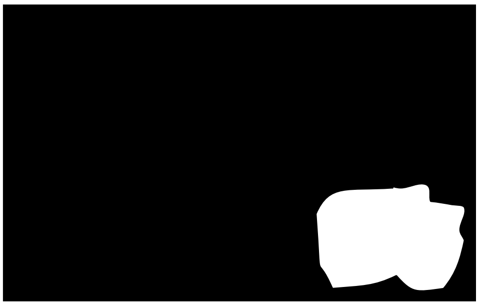


Рисунок 8 – Бинаризованное изображение компоненты, подвергшейся изменениям

Часть площади рассматриваемой компоненты (1%) согласно предложенным условиям моделирования должна занять компонента изменений с яркостью в диапазоне $L^+_{1\min} \div L^+_{1\max}$. Ее бинаризованное представление в том же пространстве уже приведено на рис. 6 и в составе компонент рис. 7*в*.

Таким образом, два отличающихся между собой по яркостям интервала $L^+_{1\min} \div L^+_{1\max}$ и $L^-_{1\min} \div L^-_{1\max}$ характеризуют с разных сторон одну и ту же пространственно расположенную компоненту. До того, как изменения произошли, вся площадь, которую занимала эта компонента, имела одни яркости, а затем часть ее изменила их, но при этом сама компонента не изменила своего положения. Это дает основания для проверки совместимости изображений (компоненты изменений и компоненты, подвергнутой изменениям), полученных двумя разными путями с помощью операций пресечения соответствующих множеств:

$$B_\cap(x,y) := B_\Delta(x,y) \cap B^0_q(x,y) = \begin{cases} 1 \quad при\, \Delta B_p(x,y) = 1 \wedge B^0_p(x,y) = 1; \\ 0 \quad при\ всех\ остальных\ сочетаниях\ значений. \end{cases} \qquad (13)$$

При этом вполне очевидно, что значимый результат (непустое множество) от пересечения рассматриваемых множеств, представленных изображениями рис. 6 и 8, однозначно свидетельствует, что компонента изменений (рис. 6) появилась за время между съемками на площади компоненты эталона, изображенной на рис. 8, наглядным и ожидаемым результатом представления множества $B_\cap(x,y)$ в этом случае является изображение, полностью совпадающее с изображением рис. 6.

[1] Рассмотренное представление не отражает соотношения площадей изменяемой компоненты объекта и компоненты изменений, а преследует целью только проиллюстрировать выполняемые сопоставления.

Такой итог обработки достаточно очевиден при отсутствии взаимных геометрических искажений пространства изображений. Не принимая этого во внимание, от операции пересечения множеств можно отказаться: она не внесла ничего нового в результат обработки, так как

$$B_{\cap}(x,y) = B_{\Delta}(x,y). \quad (14)$$

Однако, если иметь дело с анализируемыми выше геометрическими искажениями изображений (текущего и эталонного), то ситуация существенно меняется. Вместо изображения изменений (рис. 6) приходится располагать таким изображением, но с помехами (рис. 7*в*).

Характерно, что пересечение множества, представленного таким изображением, содержащим бинаризованные сегменты остатков как результат геометрических искажений (рис. 7*в*), с множеством изображения (рис. 8) приводит практически к тому же результату, то есть к изображению рис. 6.

Причина идентичности здесь состоит в том, что изображение (рис. 8) не может содержать каких-либо компонент на местах сегментов остатков, свойственных изображению рис. 7*в*. Если рис. 7*в* образован как разность $B_{\Delta}(x,y)$ геометрически несведенных текущего $B_p(x,y)$ и эталонного $B_p^0(x,y)$ изображений, то рис. 8 представляет только q-е яркостное выделение $B_q^0(x,y)$ из эталонного изображения.

К сожалению, следует заметить, что те же геометрические искажения могут и здесь влиять на результат $B_{\cap}(x,y)$. Так, множество обнаруженного сегмента изменений $B_{\Delta}(x,y)$ в силу его смещения может быть только частью множества $B_q^0(x,y)$. Несовпадающая часть его при пересечении будет потеряна, и может сложиться представление о меньшей степени изменений, чем они имеют место фактически. В то же время для пропуска изменений необходимо иметь геометрическое смещение, приводящее к несовпадению рассматриваемых множеств (пустое множество от пересечения).

Одновременно можно обнаружить, что при расположении замещаемой части компоненты изменений внутри компоненты, подвергаемой изменениям, какое-либо уменьшение размеров вследствие геометрических искажений может не проявиться вообще.

Отсюда *пятый принцип локально-яркостной сегментации состоит в избавлении от ложных тревог сегментации, вызываемых геометрическими искажениями разновременных изображений, путем образования пересечения множества изменений с множеством локально-яркостного представления и бинаризации эталонного изображения в интервале яркостей компоненты, подвергнутой изменениям.*

Комментируя этот принцип локально-яркостной сегментации можно отметить, что, кроме образования помех при геометрических различиях разновременных изображений, на изображениях, которые участвуют в формировании множеств, присутствуют шумовые яркостные выбросы. Они обусловлены физическими свойствами фотосенсоров матрицы спутникового устройства регистрации светового потока, отраженного поверхностью Земли, а также шумами электронных компонент и трактов передачи и наземного приема изображений. При этом на разновременных изображениях (эталонном и текущем) они независимы. Отсюда, возвращаясь к операции пятого принципа локально-яркостной сегментации (11), обнаружим, что разность $B_{\Delta}(x,y)$ оставляет здесь нескомпенсированными шумы выбросы яркости только текущего изображения $B_p(x,y)$. Реализация очередного, шестого, принципа $B_{\cap}(x,y) := B_{\Delta}(x,y) \cap B_q^0(x,y)$, то есть образование пересечения в силу принадлежности шумов изображения $B_q^0(x,y)$ эталонному (более раннему по времени) изображению удаляет шумовые выбросы разности $B_{\Delta}(x,y)$ в силу несовпадения мест их проявления на сопоставляемых при этом изображениях.

Выполняемое пересечение бинаризованного разностного изображения с бинаризованным изображением эталона в диапазоне компонент, подвергаемых изменениям, обеспечивает не только избавление от мешающих факторов геометрической некорректности, но и от шумовых выбросов, свойственных космической съемке.

Экспериментальная демонстрация применения

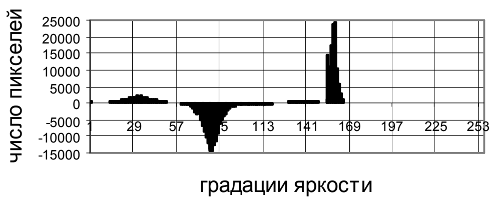
Для демонстрации результатов практического применения принципов локально-яркостной сегментации на рис. 9 представлены односпектральные изображения спутниковой съемки Landsat 7 участка поверхности Земли (Япония) до и после землетрясения и результаты их обработки на каждом из двух интервалов обнаруживаемых изменений.



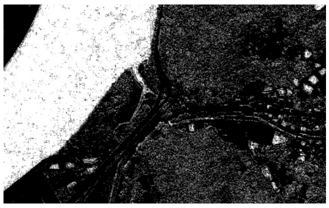
а) эталонное изображение (съемка 13.08.04)



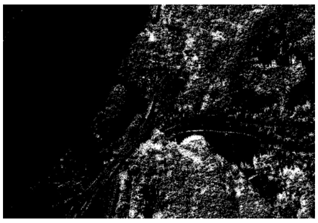
б) текущее изображение (съемка 24.10.04)



в) разностная гистограмма изображений



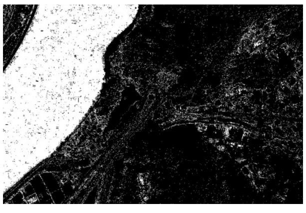
г) бинаризованный эталон в интервале 36-56 ($B_q^0(x,y)$)



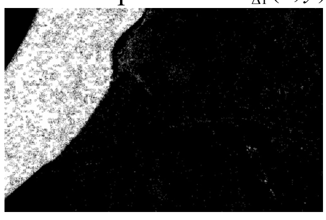
д) разность $B_{\Delta 1}(x,y)$ в интервале 13-33



е) пересечение изображений $B_{\Delta 1}(x,y) \cap B_q^0(x,y)$



ж) разность $B_{\Delta 2}(x,y)$ в интервале140-152



з) пересечение изображений $B_{\Delta 2}(x,y) \cap B_q^0(x,y)$

Рисунок 9 – Демонстрационная обработка реальных изображений спутниковой съемки

Выводы. Первый локальный яркостный интервал изменений ($L_{1\min}^{+} \div L_{1\max}^{+} = 13–33$) (*s = 32541*) оказался соответствующим в основном шумам или ошибкам геометрического сведения, которые при образовании разности $B_{\Delta 1}(x,y)$ еще проявлялись (рис. 9*д*) и большей частью были скомпенсированы после пересечения изображений (рис. 9*е*). Второй локальный яркостный интервал изменений ($L_{2\min}^{+} \div L_{2\max}^{+} = 140 - 152$) (s = 136253)

оказался информативным, позволяющим после компенсации шумов (рис. 9*з*) обнаружить, что выделенным сегментом соответствующих изменений является вся река; при этом разностная гистограмма (рис. 9*в*) свидетельствует о том, что яркость этого сегмента увеличилась по сравнению с исходным ее значением $L^{-}_{1\min} \div L^{-}_{1\max} = = 36 - - 56$ *(s=156818, а должно быть 168794)* до яркостей $L^{+}_{2\min} \div L^{+}_{2\max} = 140 - 152$, что может означать возрастание коэффициента отражения воды вероятнее всего в результате подъема со дна реки иловых отложений и размытия берегов при землетрясении.

Заключение

Проведенное рассмотрение позволяет сделать следующие выводы:

1. Локально-яркостная сегментация изменений внешнего облика объекта космической съемки строится на утверждении: если разностная гистограмма разновременных изображений объекта космической съемки $\Delta H(L) = H(L) - H_0(L_1)$ имеет положительные значения в p-ом интервале яркостей $L^{+}_{p\min} \div L^{+}_{p\max}$, то в том же порядке образованная разность самих изображений $L(x,y)$ и $L_0(x,y)$, предварительно бинаризованных в этом же (p-ом) интервале яркостей $B_p(x,y), B^0_p(x,y)$, и рассматриваемая как множество $B_\Delta(x,y) = B_p(x,y) \setminus B^0_p(x,y)$, представляет собой отображаемую область объекта (сегмент) в виде множества значений координат пикселей этих яркостных изменений за время между сеансами съемки.

2. Пять принципов сегментации, пошагово реализуемые в процессе достижения конечного результата, позволяют определить геометрическое расположение искомых изменений, диапазон их яркостей, избавиться от помех, вызывающих ошибки ложной тревоги, и защититься от недостаточной точности геометрического сведения изображений разновременной космической съемки.

3. Выполненное экспериментальное рассмотрение применения принципов локально-яркостной сегментации изменений дает возможность в приведенной практической ситуации увидеть и оценить существо каждого шага их осуществления.

Литература

1. Morton J. Canty Image Analysis, Classification and Change Detection in Remote Sensing / Morton J. – 2006. – 348 p.
2. Gustafson F. Adaptive filtering and change detection / Gustafson.F. – 2000. – 500 p.
3. Deer P. Digital Change Detection Techniques In Remote Sensing. / P. Deer // Information Technology Division. DSTO. Electronics and Surveillance Research Laboratory. – Australia, 1995. – 53 p.
4. Белозерский Л.А. Автоматизация обработки и анализа гистограмм в задачах распознавания космических изображений / Л.А. Белозерский, Л.В. Орешкина // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 3. – С. 47-54.
5. Белозерский Л.А. Оценка информационного содержания гистограмм спутниковых изображений в распознавании изменений локальных объектов / Л.А. Белозерский, Л.В. Орешкина // Проблемы информатики и управления. – 2009. – № 2. – С. 110-120.
6. Белозерский Л.А. Моделирование и анализ информативности распределений яркости локальных объектов спутникового мониторинга / Л.А. Белозерский // Искусственный интеллект. – 2007. – № 4. – С. 239-252.

Л.А. Білозерський, Л.В. Орешкіна
Принципи селективно-яскравісної сегментації змін зовнішнього виду об'єкта моноспектральної космічної зйомки
У статті розглядаються задачі, які вирішуються на етапі обробки даних дистанційного зондування Землі, та передбачають інтерактивну участь людини в оцінці якості матеріалів супутникової зйомки, покращенні отриманих зображень та тематичному використанні в залежності від думок, що розроблюються.

Статья поступила в редакцию 12.06.2009.